

Суходоева Алла Алексеевна

канд. техн. наук, доцент

ФГКВОУ ВО «Пермский военный институт войск

национальной гвардии РФ»

г. Пермь, Пермский край

Суходоева Татьяна Сергеевна

студентка

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский

политехнический университет»

г. Пермь, Пермский край

DOI 10.21661/r-469964

ПРИМЕНЕНИЕ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

***Аннотация:** статья носит обзорный характер и обобщает вопросы, связанные с моделированием процессов направленной кристаллизации: построением определяющих физических соотношений, подбором технологических режимов, температурно-временных параметров, изучением микроструктуры отливок, улучшением свойств материалов.*

***Ключевые слова:** направленная кристаллизация, литейные процессы, продольный градиент температуры, монокристаллические лопатки газотурбинных двигателей, вычислительные программные комплексы, математическое моделирование.*

Развитие таких отраслей промышленности, как аэрокосмическая техника, машино- и авиастроение, атомная энергетика, диктует необходимость усложнения геометрии конструкций, повышения требований к надежности эксплуатационных характеристик. Особенно остро стоит вопрос использования жаропрочных материалов с улучшенными свойствами для ответственных узлов машин, которые отвечали бы комплексу требований по уровню рабочих

температур, жаропрочности, ползучести, жаростойкости, термостойкости и прочности.

Например, в двигателестроении для изготовления лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) методом точного литья по выплавляемым моделям используются преимущественно жаропрочные сплавы на никелевой основе. Эти сплавы представляют собой сложные многокомпонентные гетерофазные системы, свойства которых определяются рядом термодинамических, кинетических и структурных факторов [4].

Начало изучения высокоградиентной направленной кристаллизации как научного направления относится ко второй половине двадцатого века. Один из методов, разработанный Бриджменом в 1925 г., используется до сих пор для получения монокристаллических турбинных лопаток. Кристаллы выращиваются путем вытягивания формы с расплавом из нагревателя или за счет плавного снижения температуры нагревателя, что позволяет избежать перемещения формы. Высокий уровень эксплуатационных свойств изделий, полученных методом направленной кристаллизации, обусловлен в большей мере особенностями микроструктуры: однородной, ориентированной вдоль теплоотвода, высокодисперсной.

Моделирование процессов направленной кристаллизации является актуальной сферой исследований на протяжении последних двух десятилетий. Работа [9] посвящена разработке и проверке конечно-элементных моделей профилей, полученных при направленном затвердевании отливок из никелевых сверхсплавов. Такие задачи, как выбор технологических режимов, отработка конструкции литниковой системы и подбор температурно-временных параметров, в промышленности все чаще решаются с применением программных комплексов, предназначенных для моделирования литейных процессов. Численный подход позволяет снизить затраты, поскольку все эксперименты проводятся в виртуальной среде, так же идет экономия временных и рабочих ресурсов. Низкая стоимость и короткие сроки выполнения компьютерного эксперимента, а также большой объем и наглядность

полученной информации о ходе технологического процесса и качестве будущей отливки делают компьютерное моделирование важнейшим инструментом опытного производства [3].

Анализ численного моделирования процесса затвердевания стержней проведен в работе [11] с использованием программного обеспечения ProCAST. Анализ микроструктуры в отливке проводился с использованием программного обеспечения Arphelion для определения средней площади зерен и их количества. Экспериментальная проверка подтвердила корректность построенной модели. Установлено, что увеличение скорости охлаждения приводит к повышению значения переохлаждения жидкого металла и росту количества зерен. Предполагаемое максимальное число ядер оказывает наибольшее влияние на результаты численного моделирования, выполненного для процесса направленной затвердевания.

В авиационном двигателестроении заявлены высокие требования по повышению надежности, работоспособности и экономичности газотурбинных двигателей. Стоит задача повышения мощности при одновременном снижении веса, что определяет работоспособность всей турбины. Поэтому уделяется большое внимание лопаткам с монокристаллической структурой. Задачи направленной кристаллизации являются современной проблемой. Работы [1; 3] посвящены изучению процессов получения монокристаллических лопаток газотурбинных двигателей, в них авторы используют математическое моделирование для прогнозирования формирования дендритной структуры. При проведении численных экспериментов необходимо построить такую модель, которая смогла бы качественно и количественно верно описать реальные этапы производства. Анализ исследуемой проблемы, учет технологических критериев, особенностей геометрии, физико-механических свойств расплава и т. д., являются основополагающими пунктами для постановки задачи литьевых процессов. В настоящее время существует большое разнообразие прикладных пакетов для реализации таких задач и наглядного отображения результатов исследований. Так результаты вычислительного эксперимента представлены в

работе [7] на примере процесса дискретно-непрерывного литья цилиндрических заготовок. Разработана программа влияния основных технологических параметров на процесс охлаждения заготовки. Как и в статье [6], авторы приводят постановку задачи с математическими выкладками, на основе результатов программы строят интересующие зависимости. Построению нестационарных пространственных математических моделей для непрерывного литья посвящена работа [5]. Разработанные программы позволяют получать результаты по влиянию различных факторов на качество отливок, определять рациональные теплотехнические режимы литья заготовок. Хорошее сопоставление с опытными данными позволяет нам говорить об обоснованности методов компьютерного анализа для расчета кристаллизации заготовок.

Для решения конкретных задач металлургии путем моделирования технологических процессов необходимо углубиться в проблематику литейного производства. В работе [8] приведены общие положения теории и технологии разлива стали, рассмотрены проблемы и перспективы развития. Особое внимание уделено основным положениям кристаллизации слитка, его строению и технологическим особенностям разлива различных марок стали. В монографии [2] содержится информация об архитектуре разграничения причин возникновения дефектов отливок, основных и дополнительных способах их ликвидации. Данная работа затрагивает вопросы повышения качества литья, позволяет определить наиболее существенные критерии технологии процесса разлива.

Численный эксперимент необходим для исследования эффектов различных параметров процесса на продольный градиент температуры, угол градиента температуры и положение раздела затвердевания в процессе затвердевания монокристаллической отливки [10]. Результаты работы показывают, что теплопередача оболочки или теплообмен между оболочкой и сплавом является основным фактором процесса. Повышение температуры удерживающей печи помогает улучшить продольный градиент температуры. Частота вытягивания

является наиболее важным параметром, который влияет на направленное затвердевание.

Таким образом, изучение направленной кристаллизации для моделирования литейных процессов является актуальной и широко востребованной темой исследований.

Список литературы

1. Васильева Р.Н. Математическая модель процесса направленной кристаллизации // Вестник УГАТУ технология машиностроения. – 2011. – №4 (44). – С. 185–188.
2. Воронин Ю.Ф. Распознавание разновидностей дефектов отливок, причин их возникновения и способов ликвидации / Воронин Ю.Ф., Камаев В.А // Железоуглеродистые сплавы: монография ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – 224 с.
3. Дубровская А.С. Численный анализ затвердевания и формирования структуры лопатки турбины в процессе кристаллизации // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – С. 219–222.
4. Каблов Е.Н. Перспективы и направления развития высокотемпературных материалов для авиационных и стационарных ГТД // Проблемы современного материаловедения. – 1998. – С. 10–18.
5. Повитухин С.А. Математическое моделирование затвердевания заготовки в кристаллизаторе машины непрерывного литья при разливке под шлаком: Автореф. ... канд. техн. наук. – Челябинск, 2010.
6. Рафальский И.В. Использование данных компьютерного моделирования термического анализа для моделирования процесса затвердевания сплавов / И.В. Рафальский, А.В. Арабей, П.Е. Лущик // Сборник научных трудов X международной научно-практической конференции. – Барнаул, 2009. – С. 135–139.
7. Фомина Е.Е. Моделирование и исследование процесса затвердевания заготовок при дискретно-непрерывном литье металлов / Фомина Е.Е., Жиганов Н.К. // Компьютерные исследования и моделирование. – 2009. – Т. 1. – №1. – с. 67–75.
8. Шипельников А.А. Разливка стали и кристаллизация слитка: Курс лекций / Шипельников А.А., Роговский А.Н. Ч. I. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2013. – 128 с.
9. Elliot A.J. Thermal Analysis of the Bridgman and Liquid-Metal-Cooled Directional Solidification Investment Casting Processes / Elliot A.J., Pollock T.M. //

METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A. – 2007. – P. 871–882.

10. Szeliga D. Numerical Simulation of Process Optimization in Single Crystal Casting Solidification Process / Szeliga D., Kubiak K., Burbelko A. [et. al.] // Materials Engineering. – 2016. Vol. 44. – №11. – P. 1–8.

11. of Directional Solidification of Columnar Grain Structure in CMSX-4 Nickel-Based Superalloy Castings // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2014. – Vol. 23 (3). – P. 1088–1095.